

경암층 발파현장에서 진동예측 및 장약량산정

Vibration Prediction and Charge Estimation in Hard Rock Blasting Site

박 연 수* · 박 선 준** · 최 선 민*** · 문 수 봉*** · 문 병 옥*** · 정 경 열*** · 정 태 형*** · 황 승 일*** · 김 민 중*** · 박 상 철*** · 김 정 주*** · 이 병 근†

Yeon-Soo Park, Sun-Joon Park, Sun-Min Choi, Soo-Bong Mun, Byeong-Ok Mun, Gyung-Yul Jeong, Tae-Hyeong Jeong, Seung-Ill Hwang, Min-Jung Kim, Sang-Chul Park, Jung-Ju Kim and Byeong-Geun Lee

(2009년 1월 12일 접수 ; 2009년 3월 5일 심사완료)

Key Words : Vibration Prediction(진동예측), Hard Rock Blasting(경암층발파), Reliability(신뢰성), Reliability Index(신뢰성지수), Least-squares Regression(최소제곱회귀분석)

ABSTRACT

The blasting has a lot of economic efficiency and speediness but it can damage to a neighbor structure, a domestic animal and a cultured fish due to the blasting vibration, then the public grievance is increased. Therefore, we need to manage the blasting vibration efficiently. The prediction of the correct vibration velocity is not easy because there are lots of different kinds of the scale of blasting vibration and it has a number of a variable effect. So we figure the optimum line through the least-squares regression by using the vibration data measured in hard rock blasting and compared with the design vibration prediction equation. As a result, we confirm that the vibration estimated in this paper is bigger than the design vibration prediction equation in the same charge and distance. If there is a Gaussian normal distribution data on the left-right side of the least squares regression, then we can estimate the vibration prediction equation on reliability 50% ($\beta=0$), 90% ($\beta=1.28$), 95% ($\beta=1.64$), 99.9% ($\beta=3.09$). As a result, it appears to be suitable that the reliability is 99% at the tranverse component, the reliability 95% is at the vertical component, the reliability 90% is at the longitudinal component and the reliability is 95% at the peak vector sum component.

1. 서 론

건설예정부지에 단단한 암반이 존재하여 공사를 손조롭게 진행할 수 없을 때 화약을 사용하여 발파를 수행하게 된다. 브레이크와 같은 기계의 물리적인 힘을 사용하여 암파쇄를 하는 것보다 순간적으로

로 터지는 힘을 이용하여 암파쇄를 하는 것이 경제적, 시간적으로 많은 장점이 있기 때문이다. 하지만 발파는 진동과 소음을 유발시키는 단점이 있으며 이러한 진동과 소음은 장약량이 증가함에 따라 비례하여 진동과 소음이 크게 발생한다. 그 결과 진동과 소음으로 인한 민원이 꾸준히 발생하는 실정이며 진동과 소음을 더욱 정량적으로 제어할 수 있는 필요성이 요구되고 있다. 따라서 이 논문에서 이러한 진동과 소음을 효율적으로 평가하기 위한 알고리즘을 제시하고 실제 발파진동을 구조물 부근 지반에서 측정하여 얻어진 데이터를 비교·분석하였

† 교신저자; 정희원, 전남대학교 토목공학과
E-mail : edccof@dreamwiz.com
Tel : (062) 530-5188, Fax : (062) 530-5188

* 정희원, 전남대학교 토목공학과

** 정희원, 동신대학교 토목공학과

*** 전남대학교 토목공학과

다. 발파진동은 발파원에서 지반을 따라 전달되어 인접구조물, 양식어류, 가축 등에 직접적인 피해를 발생시킨다. 이러한 진동은 구조물에 균열을 일으키고 이미 균열이 발생된 구조물에는 균열을 확장시킬 수 있다. 발파원에서 발생한 진동이 지반을 통해 최종적으로 구조물에 전달되는 진동의 크기를 결정하는 여러 가지 변수들이 존재하기 때문에 진동의 크기를 정확히 예측하기란 현실적으로 거의 불가능하다고 해도 과언이 아니다. 장약량과 패턴을 적절히 조절한다고 해도 진동값은 매우 다양하게 나타난다. 따라서 이 논문에서는 변동폭이 큰 데이터를 효율적으로 평가하기 위해 최소제곱회귀분석(least-squares regression)을 바탕으로 최적의 직선을 검토하였으며 이러한 직선에 확률이론을 도입하여 신뢰도에 따른 진동추정식을 도출하였다. 또한 국내에서는 진동 추정식을 검토할 경우 진동성분 선택에 관한 자료가 미흡한 실정이므로 각각의 진동성분에 따라 비교검토 하였다.

2. 지질특성 및 계측치

2.1 지질특성

표토층은 황갈색~갈색의 색조를 보이며 실트질모래, 부분적으로 점토 혼재되어 있다. 소량의 자갈 및 실트를 함유하는 세립내지 조립의 모래로 구성되어 있는 보통 조밀한 상태이며 0.6 m의 두께로 분포하고 있다. 풍화토층은 실트를 함유하는 세립내지 중립질의 모래로 분해되어 채취되며, 색조는 황갈색~갈색이며 지표하 심도 0.6~3.8 m 하부로부터 분포한다. 암질지수(R.Q.D.)는 0%로 나타났고 균열은 매우 근접 간격으로 나타났으며 풍화도는 보통풍화상태를 보인다. 암석층의 코어회수율(T.C.R.)과 암질지수(R.Q.D.)는 각각 97%, 60%로 나타났으며 암종은 경암층으로 판단되었고 지표하 심도 3.8~6.0 m 하부로부터 분포 하였다. 색조는 회갈색으로 암 상태는 보통강함~강함 상태를 보였으며 균열 및 절리가 발달하며 소파쇄대 협재로 나타났다.

2.2 발파 패턴도

데이터의 신뢰성을 높이기 위해 발파는 총 7회 행해졌고 총 38개의 발파진동 데이터를 수집하였다. 발파패턴에 따라 소규모·중규모·일반발파로 분류

하였으며 소규모 2회, 중규모 2회 일반발파 3회를 실시하였다. 발파패턴은 암발파 설계 및 시험발파 잠정 지침을 따른 것이다.

장약량은 1~2회에는 0.96 kg으로 발파하였으며 3~4회에는 3 kg, 5~7회에는 7.5 kg으로 각각의 장약량을 다르게 하여 장약량에 따른 발파진동 감쇠를 고려할 수 있게 행하였다. 총발파공수는 108공이며

Table 1 Geological condition at the blasting site

Stratum	Depth (m)	Thickness (m)	Composition	TCR/RQD (%)
Surfaces	0.0~0.6	0.6	Silty sand	-
Decomposed soil	0.6~3.8	3.2	Decomposed rock	-
Hard rock layer	3.8~6.0	2.2	Bed rock	97/60

Table 2 Pattern of blasting

Classification	Small scale		Medium scale		Normal scale		
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
Diameter(mm)	Less than 51 mm		76 mm		76 mm		
Sub-drilling length(m)	2.7		3.4		6.7		
Line of least resistance(m)	1.0		1.60		2.0		
Sub-drilling gap(m)	1.2		1.90		2.5		
Weight per delay(kg)	1		3.0		7.5		
Explosives	Emulsion (φ32 mm)		Emulsion (φ50 mm)		Emulsion (φ50 mm)		
Detonator	MS-electric detonator		MS-electric detonator		MS-electric detonator		
Hole(EA)	10	20	10	20	8	20	20
Total weight(kg)	10	20	30	60	60	150	150



Fig. 1 Location of Blastmate III

총장약량은 480 kg이다.

2.3 발파 계측 데이터

발파진동 계측을 위해 사용한 계측기기는 변위, 속도, 가속도, 주파수, 폭풍압(소음수준)은 모두 측정할 수 있는 INSTANTEL(社) 제품 Blastmate III

Table 3 Blating data

No.	Weight (kg)	Distance (m)	Velocity (mm/sec)			
			Tran.	Vert.	Long.	PVS
1	0.96	260	0.254	0.254	0.127	0.311
2	0.96	240	0.254	0.254	0.254	0.381
3	0.96	240	0.508	1.02	0.889	1.14
4	0.96	200	0.238	0.254	0.159	0.302
5	0.96	200	0.222	0.191	0.222	0.286
6	0.96	62	1.89	1.84	1.92	2.57
7	0.96	58	1.21	1.1	1.3	1.46
8	0.96	90	1.29	1.1	1.38	1.65
9	0.96	95	0.968	0.937	1.3	1.49
10	0.96	130	0.508	0.381	0.381	0.524
11	0.96	135	0.508	0.508	0.381	0.582
12	0.96	65	2.79	1.4	1.65	2.93
13	0.96	70	2.79	1.78	1.78	2.97
14	3	260	0.381	0.254	0.254	0.475
15	3	260	0.381	0.254	0.254	0.421
16	3	240	0.381	0.508	0.381	0.684
17	3	240	0.381	0.508	0.381	0.582
18	3	240	0.254	1.02	0.508	1.02
19	3	240	0.507	0.762	0.762	0.95
20	3	200	0.349	0.365	0.349	0.445
21	3	200	0.317	0.429	0.492	0.508
22	3	61	1.3	2.14	2.44	2.56
23	3	60	1.83	3	3.75	3.81
24	3	95	1.92	2.27	2.75	2.94
25	3	107	1.54	2.62	2.32	3.24
26	3	136	0.635	0.762	0.635	0.823
27	3	148	1.14	0.762	1.14	1.31
28	3	70	5.46	2.54	2.79	5.61
29	3	82	3.81	3.05	3.43	4.58
30	7.5	236	0.889	1.27	0.762	1.51
31	7.5	237	1.02	1.4	1.02	1.67
32	7.5	238	0.889	1.14	0.889	1.2
33	7.5	226	0.635	0.762	0.889	1.05
34	7.5	227	0.762	1.14	0.889	1.2
35	7.5	228	0.762	1.27	0.762	1.31
36	7.5	196	1.27	1.65	1.78	2.13
37	7.5	197	1.14	2.16	1.78	2.34
38	7.5	198	1.02	1.9	1.4	2.02

을 사용하였다. 거리감쇠를 고려하기 위해 계측기와 발파원과의 거리를 다르게 하였으며 계측 위치와 계측된 결과를 정리하면 Fig. 1, Table 3과 같다.

3. 진동데이터의 선형회귀분석

대부분의 오차는 데이터와 관련되어 있기 때문에 이러한 데이터를 사용해서 중간값을 예측하는 데는 다항식보간법을 사용하는 것은 부적절하며, 만족스럽지 못한 결과를 산출할 수도 있다. 실험 데이터는 대부분 이러한 유형이다. 이러한 데이터를 시각적으로 조사한 후 점들을 통과하는 '최적'의 선을 결정하는 것이다. 비록 이러한 시각적 접근법(eyeball approach)은 계산에 의해 검증되고 상식적으로 받아들일 수는 있어도 이들은 독단적인 판단으로 구한 것이기 때문에 결점이 있다. 즉, 점들을 완전한 직선상에 정의할 수 없다면 또 다른 분석자들은 다른 선을 그을 수도 있다. 이러한 주관성을 배제하기 위해서 적합한 곡선을 긋기 위한 기준이 설정되어야 한다. 그중의 한 가지 방법이 데이터 점들과 곡선 사이의 차이를 최소화시키는 곡선을 유도하는 것이다. 이 목적을 달성하는 최적의 방법은 최소제곱회귀분석이다. 계측된 데이터에 자연로그를 취한 후 식 (1)과 식 (2)에 데이터를 대입하여 일차직선의 기울기와 속도축 절편에 해당하는 상수값을 결정할 수 있다.

$$a_1 = \frac{n \sum V_i SD_i - \sum V_i \sum SD_i}{n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2} \quad (1)$$

$$a_0 = \bar{V} - a_1 \bar{SD} \quad (2)$$

여기서, n = 총데이터 수 $SD = (D/\sqrt{W})$

\bar{SD} = 평균 SD(scale distance)

$V = V, T, L, PVS$ 진동속도(mm/s)

\bar{V} = 평균속도

식 (1)의 a_1 과 식 (2)의 a_2 를 이용하여 회귀분석직 선방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\log V = a_1 \log SD + a_2 \quad (3)$$

따라서 절편 $\log K = a_2$ 와 같으므로 역로그(anti-logarithm)를 취하면 $K = 10^{a_2}$ 이며 다음 식 (4)와 같

은 멱방정식(진동추정식)으로 정리 할 수 있다. 따라서 발파진동추정식은 다음과 같다

$$V = 10^{a_2} \cdot (SD)^{a_1} = K \cdot (SD)^n \quad (4)$$

경암층 발파에서 측정된 데이터를 이러한 수식을 기준으로 측정된 데이터를 최소제곱회귀분석한 결과를 도시화하면 Figs. 2~5와 같다. 데이터의 대부분이 정수 1자리수 이하로 측정되기 때문에 소수점

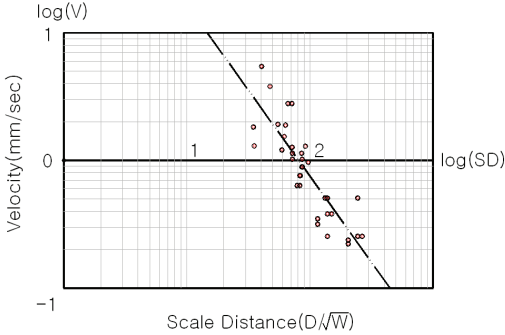


Fig. 2 Least-squares regression by transverse velocity

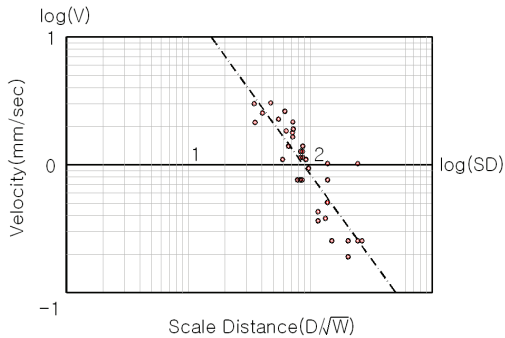


Fig. 3 Least-squares regression by vertical velocity

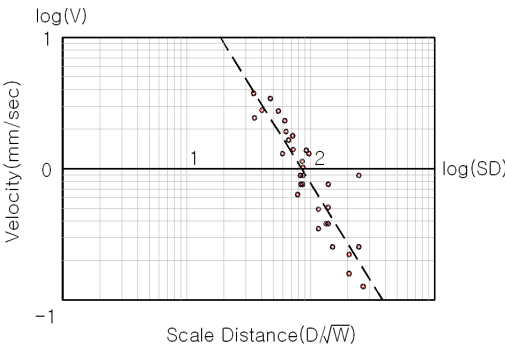


Fig. 4 Least-squares regression by longitudinal velocity

반올림이 최종적인 결과값에 큰 영향을 주게 된다. 하지만 국내에서는 아직 소수점 반올림에 관한 규정이 미비한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 이러한 영향을 최소화하기 위해 컴퓨터를 이용하여 최종 발파진동식을 도출하는 과정마다 무한 소수점 까지 고려하였다.

Fig. 6은 각각의 진동성분을 한 좌표축에 도시화하여 건설교통부 설계진동추정식과 비교한 그래프이다. 동일한 SD에서는 이 연구의 진동추정식이 건교부 진동추정식보다 진동이 크게 예측 되는 것으로 나타났다. 즉, 이 연구의 실험조건과 동일한 장소에서 건교부의 진동추정식을 적용할 경우 진동속

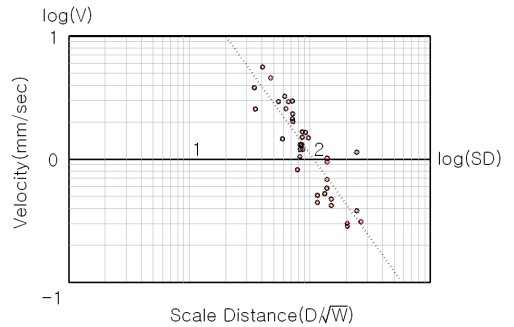


Fig. 5 Least-squares regression by PVS velocity

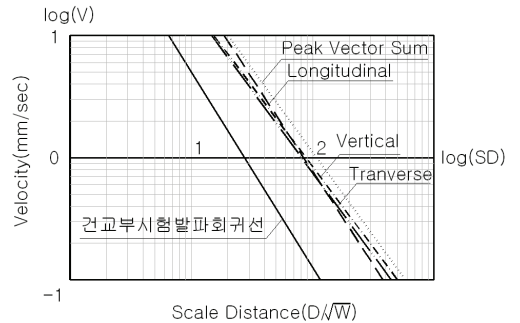


Fig. 6 Comparison of the least-squares regression with the regression of the Ministry of Construction & Transportation

Table 4 Vibration prediction equation

Component	Blasting vibration prediction equation
Transverse	$V = 382.194 \cdot (SD)^{-1.356}$
Vertical	$V = 367.439 \cdot (SD)^{-1.32}$
Longitudinal	$V = 879.695 \cdot (SD)^{-1.529}$
Peak vector sum	$V = 599.942 \cdot (SD)^{-1.367}$

도를 작게 예측하여 최적의 장약량보다 큰 장약량을 사용하게 된다는 것이다. 또한 각각의 성분별 진동추정식의 발파지수가 다양하기 때문에 특정 진동추정식이 정확하다고 판단할 수 없다. 다만 scale distance가 작은 곳에서는 tranverse의 진동추정식이 PVS의 진동추정식보다 크게 나타나 SD에 따라 특정진동성분이 엄격하게 진동속도를 예측하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 회귀선의 신뢰도 분석

신뢰성지수(β)는 3.0903, 1.6449, 1.2816, 0 을 사용하였으며 각각에 해당하는 신뢰도는 99.9%, 95%, 90%, 50%이다. 각 데이터들이 회귀분석직선을 기준으로 좌우로 표준정규분포하면 Figs. 6~9 와 같이 각 신뢰도에 따른 직선을 작도할 수 있다. 먼저 데이터와 최소제곱회귀분석선의 최단거리가 결정되어야 하며 이러한 거리는 V(velocity)와 SD (scale distance)에 자연로그를 취한 후 식 (5)를 사용하여 평가할 수 있다.

$$d_i = \frac{(V_i - a_2 - (a_1 \times SD_i))}{\sqrt{(a_1)^2 + 1}} \quad (5)$$

여기서, d_i : 회귀분석선과 데이터의 수직거리

Table 4에서의 진동추정식은 신뢰성 지수가 0인 회귀분석선에 해당한다. 따라서 일정한 신뢰성지수를 가지는 회귀분석선이 필요하며 이러한 회귀분석선을 구하기 위해서는 식 (6)에 해당하는 평행한 두 직선사이의 수직거리를 얻어야 한다.

$$d_r = \beta \cdot \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (6)$$

여기서, β : 신뢰도에 따른 신뢰성 지수

신뢰성지수 0인 회귀선과 신뢰성 지수 β 를 가지는 직선의 수직거리 d_r 을 식 (7)에 대입하면 진동속도의 증가량(속도축 방향)이 산정되므로 각각의 신뢰도에 따른 진동추정식을 산정할 수 있다. 진동속도의 증가량 a_3 는 식 (7)과 같다.

$$a_3 = \frac{d_r}{\cos(\cotan(-a_1))} \quad (7)$$

$$\log V_r = a_1 \log SD + a_2 + a_3 \quad (8)$$

$$V_r = 10^{a_2 + a_3} (SD)^{a_1} = K \cdot (SD)^n \quad (9)$$

여기서, k : 발파상수

n : 발파지수

이와 같은 방법으로 tranverse, vertical, longitudinal, peak vector sum진동속도에 대해 분석한 결과 Table 5와 같이 신뢰성지수 3.09(신뢰도99.9%)를 적용한 회귀분석선을 초과하는 데이터의 수는 각각 0, 1, 1, 1개이며 신뢰성지수 1.64(신뢰도95%)를 적용한 결과 각각 4, 1, 1, 1개가 발견되었다. 따라서 초과하는 데이터의 수가 1 이상이 되는 신뢰도를 한계신뢰도로 가정하면 tranverse, vertical, longitudinal, peak vector sum진동속도는 각각 99.9, 95, 90, 95%의 회귀선을 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

Table 6의 진동추정식을 식 (10)을 참조하여 진동규준치에 따른 허용장약량식으로 정리할 수 있으며 진동

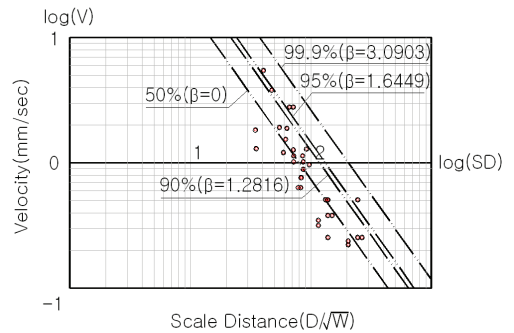


Fig. 7 Reliability analysis of the tranverse velocity

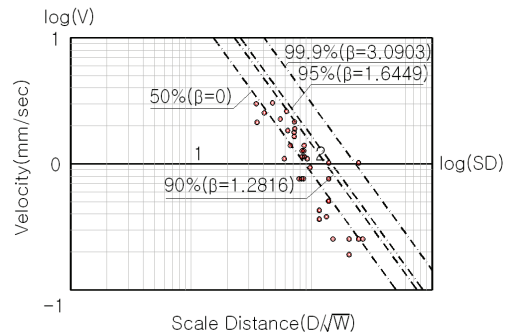


Fig. 8 Reliability analysis of the vertical velocity

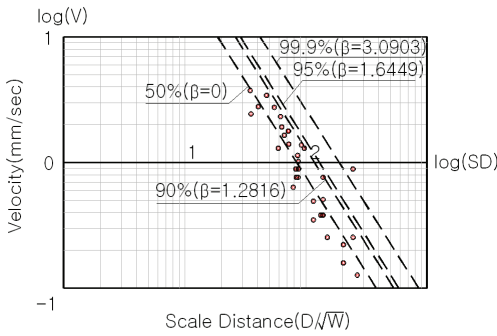


Fig. 9 Reliability analysis of the longitudinal velocity

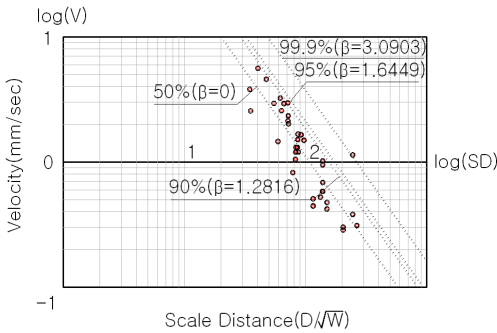


Fig. 10 Reliability analysis of the PVS velocity

Table 6 Vibration prediction equation

Component	Reliability(%)	Vibration prediction equation
Transverse	50	$V = 382.194 \cdot (SD)^{-1.356}$
	90	$V = 648.937 \cdot (SD)^{-1.356}$
	95	$V = 754.012 \cdot (SD)^{-1.356}$
	99.9	$V = 1369.88 \cdot (SD)^{-1.356}$
Vertical	50	$V = 367.439 \cdot (SD)^{-1.32}$
	90	$V = 623.252 \cdot (SD)^{-1.32}$
	95	$V = 723.961 \cdot (SD)^{-1.32}$
	99.9	$V = 1313.78 \cdot (SD)^{-1.32}$
Longitudinal	50	$V = 879.695 \cdot (SD)^{-1.529}$
	90	$V = 1466.788 \cdot (SD)^{-1.529}$
	95	$V = 1695.542 \cdot (SD)^{-1.529}$
	99.9	$V = 3018.019 \cdot (SD)^{-1.529}$
Peak vector sum	50	$V = 599.942 \cdot (SD)^{-1.367}$
	90	$V = 992.674 \cdot (SD)^{-1.367}$
	95	$V = 1144.989 \cdot (SD)^{-1.367}$
	99.9	$V = 2020.461 \cdot (SD)^{-1.367}$

Table 7 Weight equation

Component	Reliability(%)	Weight equation
Transverse	50	$w = (1.55720e - 04) \cdot d^2$
	90	$w = (7.13383e - 05) \cdot d^2$
	95	$w = (5.71767e - 05) \cdot d^2$
	99.9	$w = (2.37065e - 05) \cdot d^2$
Vertical	50	$w = (1.29798e - 04) \cdot d^2$
	90	$w = (5.82865e - 05) \cdot d^2$
	95	$w = (4.64519e - 05) \cdot d^2$
	99.9	$w = (1.88305e - 05) \cdot d^2$
Longitudinal	50	$w = (1.40458e - 04) \cdot d^2$
	90	$w = (7.19495e - 05) \cdot d^2$
	95	$w = (5.95215e - 05) \cdot d^2$
	99.9	$w = (2.79915e - 05) \cdot d^2$
Peak vector sum	50	$w = (8.59901e - 05) \cdot d^2$
	90	$w = (4.11530e - 05) \cdot d^2$
	95	$w = (3.33946e - 05) \cdot d^2$
	99.9	$w = (1.45454e - 05) \cdot d^2$

규준속도가 1 mm/sec일 경우에는 Table 7과 같다.

$$w = \left(\frac{K}{V_a}\right)^{\frac{2}{n}} \times d^2 \quad (10)$$

여기서, V_a : 목표진동규준치(mm/sec)

d : 보안물건과 발파원과의 거리(m)

ω : 최대사용장약량(kg)

5. 결 론

이 연구에서는 경암층 발파현장에서 발생하는 진동을 측정하여 정량적인 진동추정식을 산정하였으며 데이터분석 알고리즘을 정립하였다. 이 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 진동성분별로 최소제곱회귀분석을 이용하여 분석한 결과 transverse, vertical, longitudinal, peak vector sum 진동속도에서 각각 $V = 382.194(SD)^{-1.356}$, $V = 367.439(SD)^{-1.32}$, $V = 879.695(SD)^{-1.53}$, $V = 599.942(SD)^{-1.367}$ 이 산정되었으며 $SD=10.634$ 을 기준으로 이보다 작을 때는 longitudinal성분이 클 때는 peak vector sum성분이 더욱 큰 진동을 예측하는 것으로 나타났다. 그러므로 일괄적으로 하나의 진동성분을 선택하여 분석하는 것보다 정량적인 회

귀분석을 하여 발파거리에 따라 차등 적용하는 것이 합리적인 적용이 될 것으로 판단된다.

(2) 데이터의 위치가 최소제곱회귀분석선($\beta=0$)을 중심으로 좌우로 Gaussian 정규분포를 따른다고 가정하여 신뢰도에 따른 발파진동 추정식을 산정하고 분석하였다. 그 결과 진동성분에 따라 최적의 신뢰도가 다르게 평가되었다. Tranverse성분에서는 신뢰도 99%, Vertical성분에서는 신뢰도 95%, longitudinal성분에서는 신뢰도 90%, peak vector sum성분에서는 신뢰도 95% 이상이 적합하다고 판단된다.

(3) 이 연구에서는 분산을 갖는 데이터를 효율적으로 평가할 수 있는 알고리즘을 최소제곱회귀분석과 신뢰도 분석을 통해 제시하였다. 이러한 신뢰도 분석은 소음과 수중 충격압 분석 등 여러 분야에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

(1) Alfredo, H-S. A. and Wilson, H. T., 1975, "Probabilty Concepts in Engineering Planning and Design," John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
 (2) Chapra, S. C. and Canale, R. P., 2001, "Numerical Methods for Engineers," McGraw-Hill, New York, U.S.A.
 (3) Choi, B. H., Ryu, C. H., Hwang, H. J., Choi, Y. K. and Ahn, M. S, 2008, "The Role of PPV and PVS in Controlled Blasting," Vol. 26, pp. 1~10.
 (4) Dowling, C. H, "Construction Vibrations,"

Prentice Hall. U.S.A.

(5) Haugen, E. B., 1980, "Probabilistic Mechanical Design," John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.

(6) Park, Y. S., Park, S. J. and Kang, S. H., 1998, "An Efficient Blast Design Using Reliability Index," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 8, pp. 821~831.

(7) Park, Y. S., Park, S. J. and Kang, S. H., 1998, "A Reliability Analysis on the Blast Vibration Equation," Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 18, pp. 143~152.

(8) Park, Y. S., U, J. H., Jun, Y. B., Kim, E. R. and Kim, D. H., 2003, "A Study on the Construction Vibrations Prediction of Bridge Structures using the Reliability Index," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp. 442~449.

(9) Park, Y. S., Park, S. J., Kang, S. H., Jun, Y. B. and Kong, K. J., 2006, "An Experimental Study on Ground Vibration Equations by Underwater Blasting at Construction Site," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 777~783.

(10) Ryu, C. H, 2005, "Review of National Standards for Allowable Limit of Blast Vibration on Structures," Journal of Korea Society of Explosives and Blasting Engineering, Vol. 23, pp. 1~10.